

## 基于小波变换的红外图像弱小目标检测研究

牟松涛<sup>1</sup>, 苏锦鑫<sup>2</sup>, 吴建东<sup>1</sup>

- (1. 上海航天技术研究院 第八〇三研究所, 上海 200233;
2. 上海航天技术研究院, 上海 200233)

**摘要:** 针对红外图像弱小点目标检测中遇到的难点, 即信噪比低、帧间相对运动和强噪声干扰等问题, 给出了一种帧间膨胀累积提高信噪比的方法, 并且提出将  $1/f$  噪声白化和白噪声去除同步处理的新思路, 大量的仿真实验证明, 该方法能够很好地抑制噪声对图像的影响, 大大提高信噪比, 降低误检率。

**关键词:** 红外图像; 小波变换; 弱小目标;  $1/f$  噪声; 信噪比; 形态膨胀

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)05-0488-05

### Infrared small target detection technique based on wavelet transform

MU Song-tao<sup>1</sup>, SU Jin-xin<sup>2</sup>, WU Jian-dong<sup>1</sup>

- (1. The 803th Institute of Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 200233, China;
2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** In view of the difficulties in detecting long-distance target, such as low SNR, relative movement in frames and noise, a preprocessing algorithm using morphological dilation before accumulation and tracking is presented to enhance the target. Wavelet transform is adopted to remove the correlation of  $1/f$  noise in parallel scanned infrared image and keep down the gaussian noise effectively at the same time. Furthermore, the relationship between threshold, detected probability and faulty detected probability of point target in single image is also expatiated. The experimental result indicates that the algorithm can effectively detect the point target with  $SNR=2$ .

**Key words:** Infrared image; Wavelet transform; Weak small target;  $1/f$  noise; SNR; Morphological dilation

## 0 引言

红外图像弱小(即低信噪比)目标检测是精确制导技术的关键技术之一, 其弱小目标的探测性能将直

接影响截获概率和探测距离等总体使用性能指标。

在小目标阶段由于目标本身的灰度、形状、纹理和结构特征等不明显也不确定, 因此在检测过程中主要面临两个难点, 首先, 弱小目标的信噪比低, 能量弱; 其次, 图像本身带有一定  $1/f$  噪声和白噪声, 然而

收稿日期: 2003-10-02; 修订日期: 2004-02-08

作者简介: 牟松涛(1977-), 男, 上海人, 硕士生, 从事红外成像、图像处理、目标自动检测与识别及硬件 DSP 实现等方面的研究。

点目标又混在这些噪声当中。针对上述处理过程中的难点,本文分别基于形态学和小波给出了相应的解决办法,即用帧间膨胀累加的办法提高目标的信噪比;而利用小波的良好时-频局部分析特性和小波系数的正交性进行白化和消噪,并提出在对图像的一次小波处理过程中即可同时完成对有色噪声的白化和对白噪声的去除,从而大大节省了处理时间。大量仿真实验证明,该方法是有效和可行的。红外图像弱小目标检测流程如图 1 所示。

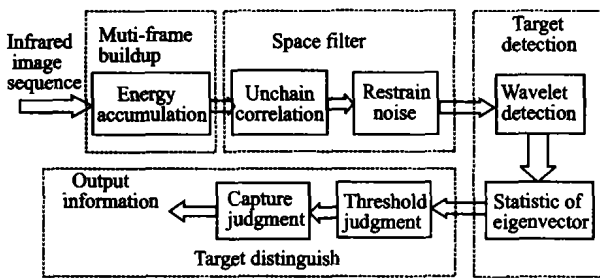


图 1 红外图像弱小目标检测流程示意图

Fig. 1 Flowchart of weak small target detection of infrared image

### 1 基于形态膨胀的能量积累

对于运动速度较大的目标,简单的帧间直接累加方法并不能够实现有效的能量累积,因此本文提出了一种基于膨胀累加的能量累积算法。

首先对图像进行膨胀运算,将目标由一个点膨胀成一个斑点,从而使不同帧上的目标能量实现累加,起到目标增强的作用。结构函数  $g(x)$  对函数  $f(x)$  的膨胀运算记为  $f \oplus g$ ,二维膨胀运算可由下式计算:

$$(f \oplus g)(x, y) = \max_{(k, l) \in D(g)} \{f(x - k, y - l) + g(k, l)\} \quad (1)$$

式中  $D(g)$  为结构函数  $g(x)$  的定义域。

本文选择平顶形的结构函数,结构函数的大小根据目标在帧间运动的大小来选择。累加平均后的图像可表示为:

$$f_a(x, y, t) = \frac{1}{N} \sum_{k=r-N+1}^t f_a(x, y, k) \quad (2)$$

式中  $N$  为累加帧数,经  $N$  帧累加平均后,目标点和噪声点的均值保持不变,而均方差变为单帧时的  $1/\sqrt{N}$ ,即使目标点的信噪比得到增强。

### 2 小波变换的基本原理

设一维连续信号  $f(t) \in L^2(R)$  (即能量有界函数)的小波变换为:

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_a \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \bar{\psi}\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (3)$$

式中  $a, b$  为尺度因子和时移因子;  $\psi(\cdot)$  为小波函数,它满足允许小波条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < +\infty \quad (4)$$

式中  $\Psi(\omega)$  为  $\psi(\cdot)$  的一个具有紧支撑的衰减振荡函数。

小波变换  $W_f(a, b)$  中尺度因子  $a$  和平移因子  $b$  都是连续的,因此连续变换主要用于理论分析和论证,在实际问题及数值计算中,  $a$  和  $b$  都必须离散化。对于一类特殊的小波变换,其尺度因子  $a$  是按二进制列取值的,因此可得  $f(x)$  的二进小波变换为:

$$Wf(j/2, x) = Wf_{j/2}(x) = f * \psi_{j/2}(x) = 2^{-j/2} \int_R f(t) \psi\left(\frac{x-t}{2^{j/2}}\right) dt \quad (5)$$

### 3 空间噪声滤波方法研究

任何红外图像系统都不可避免地受到来自背景、器件性能不稳定等方面的影响,从而使红外图像在不同程度上受到噪声的干扰,其中包括有色噪声和白噪声。目前国内外最普遍的做法是先对图像进行有色噪声的白化<sup>[1~3]</sup>,然后再采用不同方案滤除白噪声<sup>[4,5]</sup>。这样初看好像合理,但是要同时对噪声进行两次处理,即先白化再去噪。能否在一次滤波过程中同时完成有色噪声白化和白噪声去除呢?先不考虑目前所研究各种算法的复杂程度,仅考虑使用小波进行滤波,那么使用一次小波处理,和使用两次小波处理,它们的运算量至少增加一倍。

本文基于减少运算量的原则提出了有色噪声白化和白噪声去除合二为一的思路,实验证明效果非常理想,下面就对白化和去噪的原理进行简单的介绍。

#### 3.1 小波白化 $1/f$ 噪声的理论研究

$1/f$  噪声是红外系统中的一种重要的噪声干扰,

在清除  $1/f$  噪声的过程中,本文采用将  $1/f$  噪声白化处理的方法,即通过小波变换使  $1/f$  噪声变成白噪声。

在工程中通常认为  $1/f$  噪声是带通滤波后表现出来的一种统计自相似的随机过程。

$$S(\omega) = \begin{cases} \sigma_r^2 / |\omega|^\gamma & \omega_L < |\omega| < \omega_H, 0 < \omega_L < \omega_H < \infty \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

因为  $1/f$  噪声是统计自相似的随机过程,其自相关函数  $R_x(\tau) = a^{-2H} R_x(a\tau)$ ,而白噪声的自相关函数  $R_n(\tau) = (N_0/2)\delta(\tau)$ ,  $N_0$  为白噪声的单边功率谱密度。从而可以看出白噪声在不同时刻取值是不相关的(因为当  $\tau \neq 0, R_n(\tau) = 0$ ),而  $1/f$  噪声是相关的。因此,  $1/f$  噪声白化处理的关键就是去相关。

由于红外图像中主要存在探测器内部相关的  $1/f$  噪声和不相关的白噪声,可以把噪声看作加性噪声,图像序列中可以用下面的模型表示:

$$x(t) = f(t) + r(t) + \bar{w}(t) \quad (7)$$

式中  $x(t)$  为红外图像;  $f(t)$  为背景图像;  $r(t)$  为  $1/f$  噪声;  $\bar{w}(t)$  为白噪声。图像的白化就是对  $1/f$  噪声去相关。而小波变换方法能够刻画分形过程的精细结构,对于非平稳过程的分析具有一定的优越性。且因为正交变换一般是能起去相关作用的,所以小波变换对自相似的  $1/f$  噪声有很强的去相关作用,如图 2 所示。

参考文献 [3] 和 [4] 证明了  $1/f$  噪声的小波变换系数可以近似地看作彼此互不相关,通过各个尺度上方差的归一化,就能够对  $1/f$  噪声进行白化。对于含  $1/f$  噪声信号  $x(t)$ , 其小波变换系数的方差具有如下形式:

$$\text{Var}[x_n^m] = \sigma^2 2^{-m\gamma} \quad (8)$$

式中  $\gamma$  为  $1/f$  噪声的功率谱参数。由于小波变换系数近似互不相关,所以可以表示为:

$$x_n^m = [\sigma 2^{-m\gamma}] v_n^m \quad (9)$$

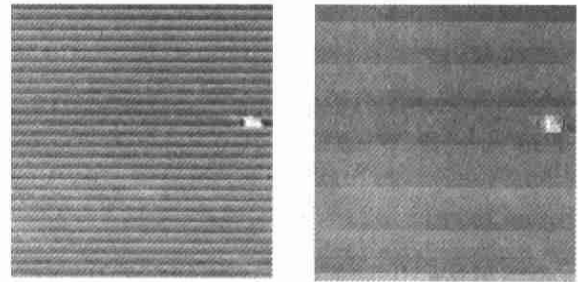
式中  $v_n^m$  是零均值,单位方差是互不相关的随机变量,它对应着一个平稳的白噪声  $v(t)$ ,事实上,  $x(t)$  包含有  $1/f$  噪声信号和白噪声信号。它们的方差分别是  $\sigma^2 2^{-m\gamma}$  和  $\sigma_w^2$ 。因此:

$$x_n^m = [\sigma^2 2^{-m\gamma} + \sigma_w^2] v_n^m \quad (10)$$

如果用

$$1/(\sigma^2 2^{-m\gamma} + \sigma_w^2)^{1/2} \quad (11)$$

对  $x_n^m$  归一化,得到一个方差为 1 且互不相关的序列。



(a) 包含水平扫描  $1/f$  噪声的红外图像

(b) 小波白化去噪效果图

(a) IR image include  $1/f$  noise (b) IR image removed by wavelet

图 2 含有色噪声红外图像的白化去噪结果

Fig. 2 Result of  $1/f$  noise removed in infrared image

### 3.2 小波消除白噪声

点目标是红外图像检测初期重要的特征信号,与平缓的背景相比,可以把点目标看作是一种奇异信号,因此,检测奇异信号具有重要意义。小波变换具有“变焦”的特性,因此,它对信号奇异点位置的确定是很有效的。Mallat 等人建立了小波变换与刻画信号奇异性的 Lipschitz 指数之间的密切关系,从而可以通过小波变换来确定信号的奇异点位置。这为点目标的检测提供了坚实的理论依据。

定义 1 设  $0 \leq \alpha \leq 1$ , 则  $f(x)$  在区间  $[a, b]$  上具有一致 Lipschitz 指数  $\alpha$ , 当且仅当存在常数  $k$ , 使得  $\forall (x_0, x_1) \in [a, b]^2$ , 有:

$$|f(x_0) - f(x_1)| \leq k |x_0 - x_1|^\alpha \quad (12)$$

称满足公式(12)的  $\alpha$  的上界  $\alpha_0$  为函数  $f(x)$  的 Lipschitz 一致正则性阶数。

定理 1 设  $0 \leq \alpha \leq 1$ , 函数  $f(x)$  在  $[a, b]$  上有一致 Lipschitz 指数  $\alpha$  的充分必要条件是存在一个常数  $k > 0$ , 使得  $\forall (x_0, x_1) \in [a, b]^2$ , 小波变换满足:

$$|W_{2^j} f(x)| \leq k (2^j)^\alpha \quad (13)$$

上式两边取对数,得:

$$\log_2 |W_{2^j} f(x)| \leq \log_2 k + \alpha j \quad (14)$$

由此可知,如果函数  $f(x)$  的 Lipschitz 指数  $\alpha > 0$ , 则该函数的小波变换系数将随着尺度的增大而增大;反之,若  $\alpha < 0$ , 则函数  $f(x)$  的小波系数将随着尺度的增大而减小。

一般来讲,信号的 Lipschitz 指数是大于 0 的,即使是不连续的奇异信号,只要在某一邻域内有界,也

有  $\alpha=0$ 。然而,噪声所对应的 Lipschitz 指数  $\alpha$  往往是小于 0 的,如高斯白噪声,它是广义随机分布的,几乎处处奇异,它的 Lipschitz 指数  $\alpha = -1/2 - \epsilon (\epsilon > 0)$ 。由公式(14)容易得出,信号和噪声在不同尺度的小波变换下呈现的特性截然相反,即随着尺度的增大,信号和噪声所对应的小波变换系数分别是增大和减小,因此,连续作若干次小波变换后,由噪声对应的小波变化系数已基本去除或幅值很小,而所余系数主要由信号控制,可根据这一原理对含噪信号进行处理。

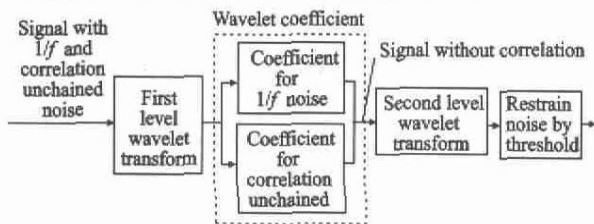


图3  $1/f$  噪声白化与白噪声去除合二为一流程图

Fig. 3 Flow chart of removing noise include  $1/f$  and gaussian noise

从去除白噪声的过程可以看出,它的主要思路是把带有白噪声的图像进行小波变换,然后对变换后的小波系数(这里可以看作主要是噪声)进行阈值处理。按照小波白化有色噪声的理论,在对图像进行小波变换处理的过程中,实际上已经把有色噪声白化为白噪声了,也就是说小波变换后的小波系数里面既包含有色噪声白化的部分,也包含白噪声自己的部分,进而再进行阈值处理,去除绝大部分的白噪声。从这里不难看出,通过小波变换,完全可以同时实现白化有色噪声和去除白噪声,如图3所示。

#### 4 目标检测与目标判别

下面用小波分解进行目标检测,依据如下:红外图像背景往往呈大面积的连续分布状态,从而使得其红外图像灰度在空间分布上具有较大的相关性。而目标的红外辐射强度与其周围自然背景的辐射强度相关性不大,一般都高于背景的辐射强度。因此可以认为红外图像中的运动点目标是一些灰度奇异点,存在于图像的高频部分,背景处于低频部分。而运用小波变换的多尺度特性,可以将图像进行低频部分与高频部分的分离,从而得到红外图像中可能的目标点。

单帧检测的结果往往不一定就是最终的捕获目标,可能还包含一些或少量的噪声点,为了增强最终点目标检测的可靠性,仍需要在单帧检测结果的基础

上,结合多帧图像序列的帧间检测关系,从序列的角度给出最终截获的一个判据。

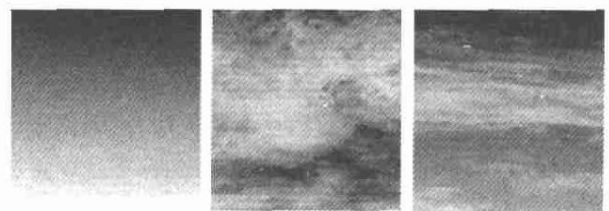
截获判决是一种基于图像序列检测结果而判决目标存在的决策方法,具体地说,如果  $N$  为检测次数, $L$  为实际检测试验成功的次数, $K$  表示要求最小的成功次数,则在  $N$  次检测试验中,至少获得  $K$  次检测的截获概率  $P_C$  为:

$$P_C(L > K) = 1 - \sum_{l=0}^{K-1} \binom{N}{l} P_D^l (1 - P_D)^{N-l} \quad (15)$$

式中  $P_D$  为单帧检测概率; $P_C(L > K)$  为截获概率。

#### 5 试验结果

图4是三幅不同天空背景、不同信噪比条件下的点目标的检测结果,它能够比较精确地给出点目标的位置,对背景的复杂程度要求也不高,最终能够根据点目标和背景的特征差别,较好地检测出点目标。



(a) 原图 SNR=1.27 (b) 原图 SNR=2.3 (c) 原图 SNR=2.96  
(a) Original image with SNR=1.27 (b) Original image with SNR=2.3 (c) Original image with SNR=2.96



(d) (a) 图的检测结果 (e) (b) 图的检测结果 (f) (c) 图的检测结果  
(d) Result of image (a) (e) Result of image (b) (f) Result of image (c)

图4 红外弱小目标检测最终效果图

Fig. 4 Final detection result of weak small target

#### 6 结论

通过对小波分析方法的研究与对红外弱小目标及其相关背景影响的分析,提出了两种方法:(1)利用帧间形态膨胀累积的方法增强运动目标的信噪比;(2)在图像的空间滤波过程中,同步进行  $1/f$  噪声白

化和白噪声的去除,并且给出了详细的理论分析。大量的仿真实验表明,采用这种方法能够取得很好的检测效果,它的优点体现在,抗强噪声干扰能力特别强,可检测到 2 个像素左右、最小信噪比达 1.2 的弱小目标,理论检测概率保证在 95% 以上,因此具有很强的应用价值。

#### 参考文献:

[1] 高新波,谢维信. 基于小波变换的分形噪声白化滤波器[J]. 西安

电子科技大学学报,1998,25(5):565-569.

[2] 朱梦宇,赵宝军,韩秋月. 用小波变换去除红外图像中  $1/f$  噪声的方法[J]. 北京理工大学学报,2001,21(5):641-644.

[3] Wornell G W. A Karhunen-Loeve-Like Expansion for  $1/f$  Processes Via Wavelet[J]. IEEE Tran IT, 1990, 26(4):859-866.

[4] Wornell G. Wavelet-based representations for the  $1/f$  family of fractal process[J]. Proceeding of the IEEE, 1993, 81: 1428-1450.

[5] 牟松涛. 基于小波变换的红外图像弱小点目标检测研究[D]. 上海:上海航天技术研究院第八〇三研究所,2003.

(上接第 464 页)

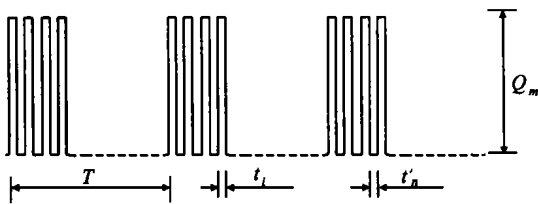


图 5 激光脉冲序列图

Fig. 5 Diagram of laser pulse sequence

#### 3.4 束散角检测

区别于传统的套孔法和反射靶板法,由采集卡将激光脉冲在 CCD 上成的光斑图像送到计算机中进行处理。由于激光并非规则的圆形,所以用质心法确定光斑中心。根据每个像素的灰度值和像素位置,计算光斑图像的中心质点,即光斑中心。然后由中心向外做半径  $R$  处一定宽度的圆环,计算该微小圆环内所有像素的灰度均值  $\rho$ ,做出  $\rho-R$  关系图,如图 6 所示。在计算机中对准确的光斑半径进行修正即可得到对应的光斑半径  $R^{[7,8]}$ 。

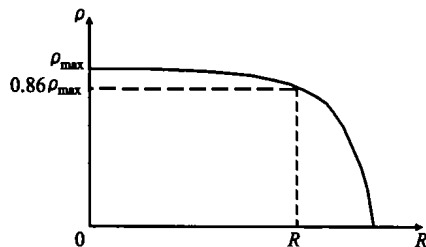


图 6  $\rho-R$  关系图

Fig. 6 Diagram of  $\rho$  as a function of  $R$

根据图 3(d)的光路,可以得到 CCD 物镜像方焦平面上的光斑大小和待测的束散角的关系式:

$$u = -\frac{2R}{f'} \quad (1)$$

式中  $u$  为待测激光的束散角; $f'$  为 CCD 物镜的焦距; $R$  为 CCD 物镜焦平面上得到的光斑半径。已知  $f'$ , 由计算机解算出激光光斑半径  $R$ , 即可得到束散角  $u$ 。

#### 4 结论

采用该结构方法,可以将激光照射指示器的整机参数结合在一台仪器上进行测试。用 VC6.0 编写计算机操作界面,汇编语言编写单片机控制和 RS232 接口程序,各模块独立运行,工作稳定,可用于部队的野外检测和维修、验收部门的室内检测。实验证明,该方案具有较高的检测精度和可操作性。

#### 参考文献:

[1] 李保平. 精确制导技术在未来制导兵器发展中的应用预测(二)[J]. 红外与激光工程,1996,25(3):54-60.

[2] 付伟. 激光侦察告警技术的现状和发展趋势[J]. 红外与激光工程,1999,29(4):12-25.

[3] 陈拥军. 宽频带激光告警技术的研究[J]. 红外与激光工程,2003,32(4):346-350.

[4] 胡以华,舒嵘,薛永祺. 地面目标激光回波特征实验研究[J]. 红外与激光工程,2002,31(2):105-108.

[5] 郝建华,曾峦. 激光多周期测距方法[J]. 红外与激光工程,2002,31(2):109-112.

[6] 王永仲. 现代光学技术[M]. 北京:科学出版社,1999.

[7] 吕海宝. 激光光电检测[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2000.

[8] 王永仲. 智能光电系统[M]. 北京:科学出版社,1999.